

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

Statistical modeling and reliability analysis for multi-component systems with dependent failures

著者	太田 修平
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	60
発行年	2019-03-31
URL	http://hdl.handle.net/10114/00021954

博士学位論文
論文内容の要旨および審査結果の要旨

論文題目	Statistical modeling and reliability analysis for multi-component systems with dependent failures
氏 名	太田 修平
学位の種類	博士（工学）
学位授与年月日	2019 年 3 月 24 日
学位授与の条件	法政大学学位規則第 5 条第 1 項第 1 号該当者（甲）
論文審査委員	主 査 木村 光宏 教授 副 査 田村 信幸 准教授 副 査 山本 久志 教授（首都大学東京）

2019 年 1 月 25 日

学位論文審査委員会


委員長 藤井 章博 殿

学位論文審査小委員会


主査 教授

木村光宏 

副査 教授

山本久志 

副査 准教授

田村信幸 

試問による学識確認の報告

法政大学学位規則第19条により、太田 修平 氏について、その論文を中心に関連する学問領域の試問を行った結果、合格と判定した。

以 上

(報告様式Ⅰ・課程博士)

2019 年 1 月 25 日


学位論文審査委員会

委員長 藤井 章博 殿

学位論文審査小委員会

主査 教授 木村 光宏 

副査 教授 山本 久志 

副査 准教授 田村 信幸 

太田 修平 氏 提出学位請求論文

「Statistical modeling and reliability analysis for multi-component systems with dependent failures」

論文内容の要旨と審査結果の要旨（報告）

（報告様式Ⅱ）

1. 論文内容の要旨

本論文は、多素子からなるシステムにおいて、複数の素子の故障発生に相互依存性がある場合について、すなわち依存故障を考慮したシステムの信頼性解析について扱ったものである。信頼性工学の分野において依存故障の数学的取り扱い、システムを構成する素子数が多くなると解析が非常に困難になるため、研究者などから長らく敬遠されてきた。もし、実際には素子が依存故障する場合に、従来通り各素子の故障発生における独立性を仮定して信頼性解析を行ってしまうと、許容範囲を超えてシステムの信頼性を見誤る可能性があることから、古くから解決が求められてきた研究テーマの一つである。

本論文は新たな数理的アプローチの開発によって、この問題を解決することを研究目的としている。そのために本論文は、多変量確率分布の一種である FGM (Farlie-Gumbel-Morgenstern) コピュラを用いた数理モデルと、ハザードレート関数の切り替わり構造によって表現する数理モデルをそれぞれ提案する。そして、それら数理モデルを基礎として、実際のシステム設計の現場で用いることができる、新しい信頼性評価手法を開発している。以下では各章の内容を詳述する。

1 章では、本研究全体の研究背景と研究目的について述べている。特に研究背景では、本研究が主題とする依存故障について、分類や実例を説明している。

2 章では、3 章および 4 章の数学的準備として、FGM コピュラの定義とその性質を述べている。本研究では FGM コピュラが変量間の依存性を表すパラメータ（以下では依存性パラメータと呼ぶことがある）を豊富に有することに着目し、それらを用いて多素子間の依存性を柔軟に表現し得ることを用いる。その一方で、FGM コピュラはそれら依存性パラメータの個数が多いことから、一般の条件下では、各パラメータが理論的に取り得る値の範囲が存在することは分かっても、それを与える陽な式としては知られていなかった。そのため、これまで FGM コピュラを用いたモデリングやパラメータの推定は困難を伴ってきた。そこで本章では新たに、いくつかの条件のもとで FGM コピュラのパラメータの取り得る値の範囲を制約式の形で表現した上で、変量の個数が増加する際の漸近的な振る舞いを明らかにした。

3 章では、互いに依存故障する n 個の素子からなる、並列システムおよび直列システムの信頼性評価モデルを提案した。その際に、各素子の寿命時間に関する依存関係、つまり各素子が初めて故障するまでの時間の長さに関する依存関係を、先述の FGM コピュラの確率則の下で記述している。そして各システムの寿命時間の確率分布および期待値（すなわち平均故障時間）を、FGM コピュラの依存性パラメータを含む式として解析的に導出し、素子数の多寡に関わらず、多素子間の依存性がシステムの信頼性に与える影響を定量的に評価できるようにした。特に、正の依存がある、つまり複数の素子が相互依存によりまとまって故障しがちな並列システムでは、依存性の強さがシステム全体の平均寿命時間を短くすることを、また反対に直列システムではそれを長くすることを解析的・定量的に示すことができている。

4章では、3章で開発したモデルのパラメータ、すなわち FGM コピュラの依存性パラメータに対する効率的な推定手法を提案し、さらにその手法によって得られた推定量が漸近正規性を有することも新たに示した。まず先述の通り、FGM コピュラはパラメータ数が多いため、一般的な推定手法である最尤法は計算困難になることに本論文では触れている。最尤法の適用には多次元空間の大域的最大化問題を解く必要があるのに対して、本研究は局所的最大化問題を繰り返し解くことで計算量を緩和している。結果として、提案手法は最尤法よりも計算時間が短く、さらに大標本の下では、本章前半で示した漸近正規性からの帰結の通り推定精度が良いため、有用であると結論づけている。

5章では、素子の故障時刻データを用いた、並列システムにおける依存故障の発生有無の統計的検定手法を開発した。特に本章では依存故障の一種であるカスケード故障 (cascading failure, ある素子の故障に誘発された連鎖的な故障) を研究対象としている。具体的には、提案する検定手法の実用性を示すために数理モデルを用いたシミュレーションを行なっている。本章での研究の流れとしては、まず連鎖的な故障現象をハザードレート関数の切り替わり構造によって表現した上で、故障時刻に関するシミュレーションデータの作成を行ない、いくつかの想定した故障ケースに対して、提案手法に基づいて依存故障があったのか、無かったのかの統計的判別精度を評価した。結果として、システム内で素子の依存故障が発生していた可能性を、確率値として評価可能であることを示している。

6章では、各章ごとのまとめを述べた上で、本研究で得られた結果を総括している。

付録では、各章で得られた定理に対する、数学的証明を与えている。

2. 審査結果の要旨

本論文は、システムを構成する複数の素子間の依存性を考慮した、新たなシステムの数理モデルを開発することで、依存故障に対する実用的な信頼性解析手法の提案を行なった。審査の結果、各章において以下に挙げられる学術的な新規性と有効性を確認した。

2章で明らかになった、ある条件下での FGM コピュラのパラメータが満たすべき制約式は、FGM コピュラを基礎としたモデリングおよび推定には必要なものである。従来はこの制約式が陽な式で求まっておらず、これを解決した点に本研究成果の新規性および有効性がある。

3章で得られた、依存性パラメータを含むシステムの平均故障時間の陽な式は、当該研究分野において新規性がある。また得られた式からは、各素子間の依存性が強まるときに、システムの信頼度が受ける影響を定量的に評価可能としており、これはシステムの信頼性を高めるための設計などに応用が期待できる有用な研究成果である。

4章では、多変量確率分布である FGM コピュラのパラメータを、効率的かつ統計的に精度良く推定する手法を提案した。本論文は推定精度の保証のために、得られる推定量は漸近正規性を満たすという理論的な証明を行なっており、提案手法が実用的な手法であることを示している。また、本成果は信頼性に関わるデータのみならず、経済や金融で得られ

る様々な多変量データに対して適用できることから応用性も高いと言える。

5章では、本研究独自のアイデアである、ハザードレート関数の切り替わり構造によって、素子のカスケード故障のメカニズムを数理モデルで表現した。さらに統計的検定によって、素子の故障時刻データからカスケード故障の発生有無を判定する手法を開発した点は、高い信頼性を具備すべきシステム開発に有用であるため、実用性のある研究成果である。

以上本論文では、多素子間の依存故障に対する信頼性解析手法の新たな理論的枠組みを構築した。本成果は、依存故障が起こる場合のシステムの最適保全計画や品質管理にも適用が可能であり、応用上の柔軟性も高いと言える。また、本研究はFGM コピュラが統計的分析に有用であることを示しており、その成果は信頼性解析のみならず、様々な研究分野にも応用が可能であるため、他の研究分野への影響は大きいと言える。よって、本審査小委員会は全会一致をもって提出論文が博士（工学）の学位に値するという結論に達した。

（報告様式Ⅲ）